

タイトル (Title)

車椅子乗員の衝突安全性を成立させる拘束系成立条件の導出と要素分解

Derivation of Design Conditions and Element Decomposition for Crash Safety of Wheelchair Occupants

著者 (Authors)

吉井 勝司 (Katsushi Yoshii)

Email: Katsushi.y.1995@gmail.com

所属 (Affiliation)

フリーランス (Freelance)

概要

車椅子のまま自動車に乗車する場合、車両・拘束装置・車椅子それぞれが異なる設計前提で成立しており、車椅子乗員の安全性は体系的に定義されていない。この構造的ギャップにより、拘束装置が機能しない、もしくは評価不能となる問題が生じている。

既存研究により、シートベルト付き車椅子において傷害指標の改善が報告されているが、その成立要因は設計原理として十分に整理されていない。

本研究では、既存の実験知見および事故分析を踏まえ、車椅子乗員の衝突安全を成立させる拘束系設計の条件を抽出し、要素分解により構造的に整理した。その結果、拘束荷重の伝達経路、拘束配置の再現性、および荷重制御と乗員挙動制御の統合が、成立条件として重要であることを示した。

さらに、本構造が内包する背反関係を整理し、車椅子乗員という未定義領域における安全設計の枠組みを提示する。

キーワード (Keywords)

車椅子乗員, シートベルト, 拘束系, 衝突安全, 荷重伝達経路, 設計原理, 人間中心設計

Abstract

When wheelchair users remain seated in their wheelchairs during vehicle transportation, the design assumptions of the vehicle, restraint system, and wheelchair are not aligned, resulting in an undefined safety condition. This structural mismatch leads to situations in which restraint systems do not function properly or cannot be adequately evaluated.

Previous studies have reported improvements in injury metrics using seatbelt-equipped wheelchairs. However, the underlying mechanisms of these improvements have not been sufficiently clarified in terms of design principles.

In this study, based on existing experimental findings and accident analyses, the conditions required for establishing occupant protection for wheelchair users are extracted and systematically analyzed through element decomposition. The results indicate that the following factors are essential for achieving a valid restraint system: (1) appropriate load path design, (2) reproducibility of restraint geometry, and (3) integration of load management and occupant kinematics control.

Furthermore, the inherent trade-offs within the proposed structure are discussed, and a framework for safety design in this previously undefined domain of wheelchair occupants is presented.

Keywords :

Wheelchair occupant, Seatbelt, Restraint system, Crash safety, Load path, Design principles, Human-centered design

1. はじめに

車椅子のまま自動車に乗車する場面は、高齢化の進展とともに増加している。しかしながら、車椅子乗員の安全性は体系的に定義されているとは言い難い。その背景には、車両、拘束装置（シートベルト）、および車椅子がそれぞれ異なる設計前提で成立しているという構造的課題がある。

一般的な車両は座席に着座した乗員を前提として設計され、シートベルトもその姿勢および位置関係に最適化されている。一方で、車椅子は日常移動および姿勢保持を目的とした装置であり、衝突時の拘束や荷重伝達は前提とされていない。この前提の不一致により、「車椅子のまま乗車する」という状況では、拘束装置が本来の機能を十分に発揮できない、あるいは評価が困難となる場合がある。

この課題に対して、従来は車両乗車専用の車椅子を前提とした解決策も考えられてきた。しかし、車椅子利用者の実態を考えると、日常使用する車椅子とは別に専用車椅子を用いるこ

とは、乗車時に移乗を必要とし、利用者および介助者の負担を増大させる。その結果、安全性が成立していても、実際の運用において使用されない可能性がある。

そこで本研究では、車椅子を専用化する方向ではなく、日常使用される汎用車椅子を前提とした設計に基づき、車椅子乗員の安全性を成立させる条件を検討する。この設計方針により、利用者の移乗を前提としない運用が可能となり、個々の利用者に適合した車椅子においても安全性を確保できる可能性が生まれる。

既存研究では、シートベルト付き車椅子を用いることにより傷害指標の改善が報告されているが、その成立要因は個別の構成要素の効果として示されるにとどまっている。本研究ではこれらの知見を踏まえ、車椅子乗員の衝突安全を成立させる拘束系設計の原理を抽出し、要素分解により構造的に整理することを目的とする。

その結果として、車椅子乗員の安全性は、拘束荷重の伝達経路、拘束配置の再現性、および乗員挙動制御といった複数要素の整合により成立することを示す。さらに、安全性と運用性の中に存在する背反関係について考察し、車椅子乗員という未定義領域における安全設計の方向性を示す。

2. 車椅子乗員安全の構造的課題

2.1 各構成要素の設計前提

車椅子のまま自動車に乗車する場合、車両、拘束装置（シートベルト）、および車椅子はそれぞれ独立した設計前提に基づいて成立している。

車両は座席に着座した乗員を前提として設計されており、拘束装置はその姿勢および位置関係に適合するよう最適化されている。一方、車椅子は日常移動および姿勢保持を目的とした装置であり、衝突時の荷重伝達や拘束性能は設計対象とはなっていない。

このように、各構成要素は個別には合理的に設計されているものの、「車椅子のまま乗車する」という状況はそれらの設計前提の重なりによって成立しており、統一された設計条件が存在しない。

2.2 前提不一致による拘束不成立

設計前提の不一致は、拘束装置の機能不全として現れる。具体的には、車椅子構造との干渉や乗員位置のばらつきにより、シートベルトの経路および密着性が安定せず、衝突時の拘束が遅れる、あるいは適切に作用しない場合がある。

また、拘束が不十分な場合には乗員の前方移動量が増大し、サブマリン現象の発生や二次衝突のリスクが増加する。さらに、拘束荷重が適切に分散されず、車椅子構造の特定部位に集中することによって、構造破綻を誘発する可能性もある。

2.3 評価基準の不在

この問題の本質的な難しさは、危険性の有無そのものではなく、評価の枠組みが定義できない点にある。

現行の車両および拘束装置に関する規格は、座席に着座した乗員を対象としており、車椅子乗員を想定していない。その結果、性能評価の基準設定が困難となり、合否判定や設計妥当性の検証が体系的に行えない状況が生じている。

また、車両、車椅子、および運用の責任範囲が明確に分離できないことも、設計および改善を困難にする要因となっている。

2.4 個別要素最適化の限界

実際の福祉車両における車椅子乗員の拘束条件を見ると、これらの要素は設計意図通りに機能していない場合が多い。多くの福祉車両では車椅子用のシートベルトが用意されているものの、そのアンカーポイントは車椅子乗員の身体位置に対して最適化されておらず、車両構造や介助者の作業性を優先した配置となっている。

また、拘束装置は胸部用および腰部用で独立した構成となっており、それぞれにリトラクターが設けられているため、衝突時における拘束のタイミングおよび荷重伝達が分離する構造となっている。このような構成では、乗員拘束が時間的・力学的に統合されず、結果として拘束性能が低下する可能性がある。

さらに、車椅子乗員用の拘束系においてはフォースリミッターが設定されていない場合が多く、衝突時における荷重制御の観点からも課題が残されている。

このように、個別要素としては合理的な構成であっても、構成要素間の関係性が設計されていない場合、拘束系としての機能は成立しない。したがって、本課題は個別要素の性能向上ではなく、拘束系全体の成立条件を再構成する設計問題として捉える必要がある。

図1に、車椅子乗員の挙動と拘束系構成要素の関係を示す。

衝突時の乗員挙動（例：サブマリン現象）は、胸部および腰部の挙動として現れ、それぞれがシートベルトの拘束特性（ベルト経路、フォースリミッター、ELR）および車椅子構造（固縛条件、剛性）により規定される。

このように、個別要素は独立に作用するのではなく、相互に関連しながら乗員挙動を決定しており、拘束系として統合的に設計される必要がある。

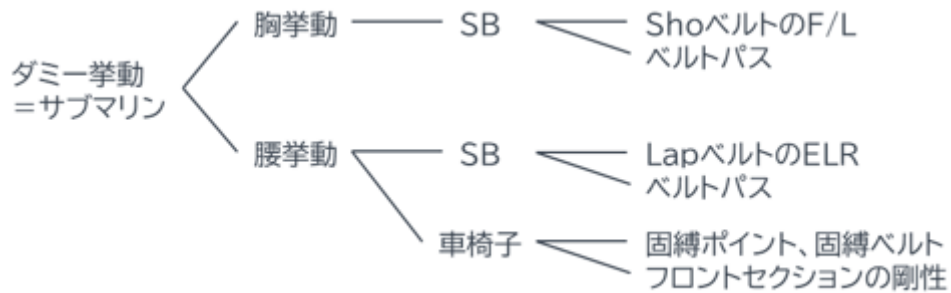


図1 車椅子乗員の挙動と拘束系構成要素の関係

3. 拘束系設計原理

3.1 従来構造における成立限界

車椅子乗員に対して車両側のシートベルトを適用する従来構造では、車椅子は通常、複数の固定具により車両に固縛され、拘束装置としては車両に備え付けられた車椅子乗員用シートベルトが使用される。

しかしながら、この構造ではシートベルトのアンカレッジポイントが車椅子乗員の身体位置に対して適切に設定されていない場合が多く、さらに車椅子のフレームや車輪との干渉により、ベルト経路の確保および十分な密着性の確保が困難となる。その結果、衝突時において拘束装置が本来の機能を発揮できず、乗員保護性能が低下する。

この問題に対して、拘束装置の改善のみで対応することは困難であり、拘束装置、車椅子、および車両の関係性を含めた構造的な再検討が必要である。

3.2 拘束成立条件の導出

車椅子乗員に対して有効な拘束を成立させるためには、以下の条件が満たされる必要がある。

- 乗員に対して適切な拘束位置（アンカレッジポイント）が設定されること
- シートベルトが人体に対して干渉なく密着できる経路を有すること
- 拘束が時間的・力学的に一体として機能すること
- 衝突時に発生する荷重が適切に制御されること

従来構造では、これらの条件のうち複数が同時に満たされておらず、結果として拘束系としての成立が阻害されている。

この問題に対し、拘束装置を車椅子側に配置することにより、乗員と拘束装置の幾何関係を安定化させることが可能となる。これにより、アンカレッジ位置の適正化およびシートベル

トの密着性の確保と言った条件は満たされる。

しかしながら、拘束装置を車椅子側に配置した場合、衝突時に発生する拘束荷重は車椅子構造に入力されるため、車椅子に高い強度を要求する状態となる。この場合、車椅子は乗車専用の構造とせざるを得ず、利用者の移乗が前提となるため、実使用環境における適用性に課題を残す。

3.3 荷重経路設計と構造転換

上述の課題に対し、本研究では拘束荷重の伝達経路そのものを再構成する設計を導入した。

図2に、従来構造と本研究で提案する構造における拘束荷重の伝達経路の違いを示す。

従来構造では、シートベルトは車椅子構造と干渉し、拘束荷重は車椅子構造および複数の経路へ分散する。

一方、本研究の構造では、シートベルトが乗員に密着し、拘束荷重は一方向に集約され、車両構造へ伝達される。

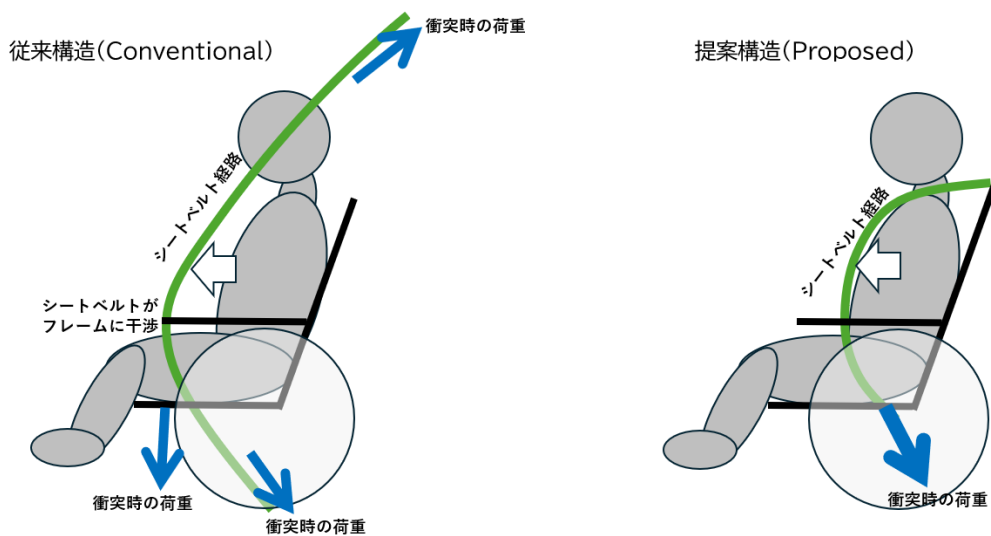


図2 従来構造と提案構造における拘束荷重伝達経路の比較

すなわち、従来は車椅子構造を介して支持されていた拘束荷重を、車椅子に依存せず、より高剛性な車両構造へ直接伝達する構造とした。

この設計転換により、拘束装置を車椅子側に配置しつつも、拘束荷重を車椅子構造から分離することが可能となる。

その結果

- 乗員基準でのアンカレッジ位置設定
- ベルト経路の非干渉化と密着性向上
- 単一拘束系としての挙動一体化
- 荷重制御機構（フォースリミッター）の適用

といった条件を同時に満たすことが可能となる。

さらに、拘束荷重が車椅子構造に依存しないことにより、車椅子に高い衝突強度を要求する必要がなくなる。これにより、車椅子を専用設計とすることなく、汎用車椅子を前提とした安全設計の成立が可能となる。

このように、拘束荷重の伝達経路を再定義することが、車椅子乗員の安全性を成立させるための根本的な設計条件であるといえる。

3.4 拘束成立条件の統合

上記の検討より、車椅子乗員の安全性は単一の要素ではなく、複数の設計条件が相互に関連することで成立する。本研究において抽出された主要な成立条件を以下に示す。

- アンカレッジ位置が乗員に適合していること
- シートベルトが構造干渉を受けず密着できること
- 拘束が単一系として機能すること（リトラクターの統合）
- 拘束荷重が車両側へ適切に伝達されること
- 荷重制御機構が適用可能であること

これらの条件は相互に依存しており、いずれか一つを満たすだけでは拘束系としての成立には至らない。すなわち、本課題は個別要素の最適化ではなく、拘束系全体の構造として設計されるべき問題である。

いずれか一つを満たすだけでは成立しない。

4. 要素分解による設計要件整理

4.1 設計要素の分解

前章において、車椅子乗員の安全性は拘束装置単体の性能ではなく、複数要素の関係性により成立することを示した。これを踏まえ、本章では拘束系を構成する要素を分解し、各要素に求められる設計要件を整理する。

本研究では、車椅子乗員の拘束系を以下の要素に分解する：

- 乗員（人体）
- 車椅子（支持構造）
- 拘束装置（シートベルト）
- 車両（支持およびエネルギー吸収）
- 使用条件（装着・運用環境）

これらの要素は独立に設計されるのではなく、相互に作用し合うシステムとして成立する。したがって、各要素の設計要件は単独ではなく、他要素との関係性の中で定義される必要がある。

4.2 拘束装置に対する設計要件

拘束装置は乗員の運動制御および荷重制御を担う中核要素であり、以下の条件を満たす必要がある：

- 乗員に対して適正なアンカレッジ位置が設定されること
- シートベルトが構造干渉を受けず、人体に密着できること
- 拘束が単一の系として機能すること（リトラクターの一体化）
- 荷重制御機構（フォースリミッター等）を適用できること

特に、拘束系が複数に分断されている場合、拘束タイミングおよび荷重伝達が統合されず、乗員制御が困難となる。したがって、拘束装置は全身を一体として拘束できる構成であることが重要である。

4.3 荷重伝達に対する設計要件

衝突時に発生する拘束荷重の取り扱い、拘束系設計の根幹をなす要素である。本研究の検討より、以下の条件が必要である：

- 拘束荷重が適切な支持構造へ伝達されること
- 荷重が車椅子構造に過度に依存しないこと
- 荷重伝達経路が明確であり、再現性を有すること

従来構造では、車椅子が荷重伝達経路の一部として機能していたため、構造破綻および拘束不成立の要因となっていた。これに対し、荷重伝達経路を再構成することで、拘束装置と支持構造の役割分離が可能となる。

4.4 幾何条件および非干渉条件

拘束装置の性能を発揮するためには、幾何的条件の成立が不可欠である：

- シートベルト経路が車椅子構造と干渉しないこと
- 乗員位置に対してアンカレッジ位置が安定していること
- 姿勢変化に対して拘束状態が大きく変化しないこと

特に車椅子は多様な構造を有するため、拘束系は個別形状に対して過度に依存しない設計

であることが望ましい。

4.5 使用条件および運用性

実使用環境における成立条件として、以下が重要である：

- 乗員が容易に拘束装置を装着できること
- 介助者の作業負担が過大とならないこと
- 日常使用と車両乗車が分断されないこと

特に、移乗を前提とする構造は利用者の負担を増加させ、実際の運用において使用されない可能性がある。したがって、安全性は実際の使用条件下で成立することが重要である。

4.6 設計要件の統合と一般化

以上の検討より、車椅子乗員の安全性は以下の設計要件の統合により成立する：

- 乗員基準での拘束幾何条件の確立
- 単一拘束系による運動制御
- 適切な荷重制御
- 明確な荷重伝達経路の確保
- 実使用条件に適合した運用性

これらの要件は特定の構造に限定されるものではなく、車椅子側での実現、車両側での再設計、あるいはその組合せにより実現可能である。

すなわち、本研究で示した設計原理は特定の解に依存するものではなく、車椅子乗員の安全性を検討するための共通基盤として位置付けられる。

5. 考察および今後の課題

5.1 設計転換の意義

本研究では、車椅子乗員の安全性を、個別要素の改良ではなく拘束系全体の成立条件として再定義した。特に、拘束荷重の伝達経路を再構成することで、従来両立が困難であった拘束性能と運用性を同時に成立させる可能性を示した点に意義がある。

この設計転換により、従来は専用構造に依存していた安全設計を、汎用構造を前提とした形で成立させることが可能となり、実使用環境における適用性が大きく向上する。

5.2 背反関係と設計上のトレードオフ

一方で、本研究で示した構造は複数の背反関係を内包している。

代表的なものとして以下が挙げられる：

- 安全性と運用性の両立
- 汎用性と最適性の両立
- 構造簡素化と機能統合の両立

例えば、シートベルトを車椅子側に配置する構成は、拘束性能および装着性の観点から有効である一方で、機器の環境耐性（防水・耐久性）、保守性、および責任分担といった側面で新たな課題を生じる。

また、拘束装置が車椅子と一体化する場合、従来は車両側が担っていた安全機能の一部が車椅子側に移行するため、製品責任や制度上の枠組みに関する整理が必要となる。

5.3 社会実装上の課題

設計原理として成立する構造であっても、社会実装には以下のような課題が存在する：

- 法規および認証制度との整合性
- 車両メーカーと車椅子メーカーの責任分担
- 使用環境（雨水、泥はね等）への対応
- 運用ルール（身体拘束との関係性）

これらの課題は単一の技術領域で解決できるものではなく、工学、制度、運用の複合的な検討が必要である。

5.4 一般化と今後の展開

本研究では、シートベルト付き車椅子という具体的構成を通じて設計原理を導出したが、ここで整理した要件は特定構造に限定されるものではない。

むしろ、本研究で得られた知見は、

- 車椅子側での実装
- 車両側での再設計
- 両者の役割再分担

といった多様なアプローチに展開可能である。

今後は、これらの設計要件を基に、異なる構成における安全性評価および最適設計の検討を進めることが重要である。

5.5 本研究の位置付け

本研究は、従来「評価できない問題」として扱われてきた車椅子乗員の安全性について、設計原理の観点からその成立条件を明確化したものである。

すなわち、本研究の目的は特定の解を提示することではなく、車椅子乗員の安全性を検討するための設計基盤を提示することにある。

6. 結論

本研究では、車椅子乗員の安全性が体系的に定義されていないという課題に対し、拘束系設計の成立条件を構造的に整理した。

まず、車両、拘束装置、および車椅子がそれぞれ独立した設計前提に基づいていることにより、「車椅子のまま乗車する」という状況において拘束系が成立していないことを示した。特に、拘束位置の不整合、拘束装置の密着性低下、および荷重伝達経路の不整合が主要な要因であることを明らかにした。

次に、これらの課題に対して、拘束荷重の伝達経路を再構成する設計を導入し、拘束系として成立する条件を導出した。その結果、車椅子構造に依存しない荷重伝達、乗員基準での拘束位置の確保、および拘束装置の統合的な機能が、安全性成立のための基本条件であることを示した。

さらに、これらの条件を満たす構成として、汎用車椅子を前提とした拘束系の成立可能性を示し、従来の専用構造に依存しない設計の方向性を明らかにした。この設計により、安全性と運用性の両立が可能となることを示した点は、本研究の重要な成果である。

また、本研究では一度安全性と利便性を両立する理想的な構成を導出した上で、その成立要因を要素分解し、現実の制約条件下において実装可能な設計要件へと展開した。このプロセスにより、単一の解に依存せず、設計自由度を確保しながら安全性を追求することが可能であることを示した。

以上より、本研究で示した設計原理は、車椅子乗員という従来十分に定義されてこなかった領域に対し、安全性設計の基盤を与えるものであると考えられる。今後は、本研究で整理した要素を基に、車両側設計、拘束装置設計、および運用条件を含めた統合的な評価手法の構築が求められる。

本研究は、車椅子乗員の安全を「個別要素の改善問題」から「設計原理の問題」として再定義するものである。

謝辞

本研究の一部は複数機関との共同検討の過程で得られた知見に基づくが、本稿の内容は著者個人の見解として整理したものである。

参考文献

- [1] 一杉 正仁, 桑原 歩夢, 福祉車両に乗車する車椅子利用者の安全性—安全な拘束装置の提案—, 自動車技術, Vol. 79, No.6, pp.124-130, 2025
- [2] 一杉 正仁, 桑原 歩夢, 車椅子乗員の安全確保に向けた拘束装置の提案, 自動車技術会 2025 年春季大会学術講演会予稿集, No. 79-25, 2025
- [3] 一杉 正仁, 桑原 歩夢, 福祉車両に乗車する車椅子利用者の安全性について—ダミーを用いたスレッド試験による検証—, 自動車技術会 2024 年春季大会学術講演会予稿集, No. 81-24, 2024
- [4] 桑原 歩夢, 一杉 正仁, 車椅子乗員の死亡事故についての検討—より効果的なシートベルト装置の提言—, 日本交通科学学会誌, Vol. 23, No. 1, pp.24-32, 2023